



⑯ BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

# ⑯ Patentschrift

⑯ DE 39 42 560 C 2

⑯ Int. Cl. 6:

H 05 H 1/46

H 03 K 17/687

DE 39 42 560 C 2

⑯ Aktenzeichen: P 39 42 560.8-33  
 ⑯ Anmeldetag: 22. 12. 89  
 ⑯ Offenlegungstag: 27. 6. 91  
 ⑯ Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 2. 5. 96

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑯ Patentinhaber:

Dressler Hochfrequenztechnik GmbH, 52224 Stolberg, DE

⑯ Vertreter:

Patentanwälte von Kreisler, Selting, Werner et col., 50667 Köln

⑯ Erfinder:

Hansen, Ulrich, Dipl.-Ing., 5190 Stolberg, DE

⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

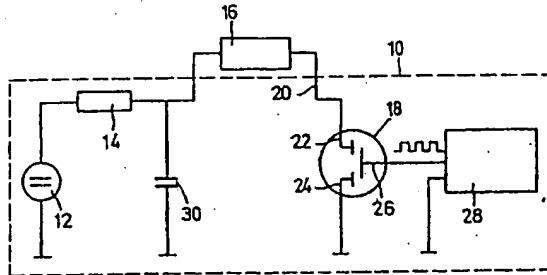
DE 36 32 340 A1  
 DE 35 38 494 A1  
 DE 33 37 811 A1

R. Paul: »Elektronische Halbleiterbauelemente«, Verl. B.G. Teubner Stuttgart, (1988) S. 338-347;  
 J.V. Vossen in J. Electrochem. Soc. -SSST, Bd. 126, Nr. 2 (1979) S. 319-324;  
 Elektronik 15/26.7.1985, S. 61-65;

⑯ Hochfrequenz-Generator für einen Plasma erzeugenden Verbraucher

⑯ Hochfrequenz-Generator für einen im MHz-Bereich zu betreibenden plasmaerzeugenden Verbraucher (16; 42), mit einer Gleichspannungs-Energiequelle (12; 32) für den Verbraucher (16; 42) und mindestens einem durch ein hochfrequentes Rechteck-Steuersignal einer Steuerschaltung (28) gesteuerten elektronischen Schalter, wobei

- die Schaltung mindestens einen POWER-MOSFET-Transistor (18) aufweist, der interne Drain-, Source- und Gate-Elektroden aufweist, welche über jeweils mehrere Bonddrähte mit externen Drain-, Source- und Gate-Anschlüssen (22', 23, 23', 25, 25', 28') eines Gehäuses (17) des MOSFET-Transistors (18) eigeninduktivitätsvermindernd verbunden sind,
- das Gehäuse (17) des MOSFET-Transistors (18) zwei mit dem Verbraucher (16; 42) verbindbare gateseitige Source-Anschlüsse (26, 26') und zwei mit der Steuerschaltung (28) verbundene drainseitige Source-Anschlüsse (23, 23') aufweist, wobei die gataseitigen und die drainseitigen Source-Anschlüsse (25, 25', 23, 23') über getrennte Bonddrähte mit den Source-Elektroden des MOSFET-Transistors (18) verbunden sind,
- die Anschlüsse (22', 23, 23', 25, 25', 28') des Gehäuses (17) des MOSFET-Transistors (18) jeweils Stripline-Struktur aufweisen,
- der plasmaerzeugende Verbraucher (16; 42) direkt ohne Zwischenschaltung eines Leistungsanpassungsnetzwerkes mit der Energiequelle (12; 32) und den Source- und Drain-Anschlüssen (23, 23', 22) verbindbar ist und
- die Energiequelle (12; 32) selbst die zum Betreiben des plasmaerzeugenden Verbrauchers (16; 42) benötigte Betriebsspannung liefert, ohne daß eine Transformation der durch den MOSFET-Transistor (18) abwechselnd ein- und ausgeschalteten Ausgangsspannung der Energiequelle (12; 32) erforderlich ist.



DE 39 42 560 C 2

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen Hochfrequenz-Generator für einen Plasma erzeugenden Verbraucher, mit einer Energiequelle für den Verbraucher.

Für die Spannungsversorgung von Plasma erzeugenden Verbrauchern, z. B. Plasmakammern zum Ätzen, Sputtern o. dgl. oder CO<sub>2</sub>-Leistungslasern, aber auch zur Spannungsversorgung von Spulen industrieller Heizungssysteme werden Hochfrequenz-Generatoren eingesetzt, die eine Ausgangsspannung mit einer Frequenz zwischen 50 kHz und 50 MHz liefern. Bei diesen Spannungsquellen handelt es sich um Leistungsgeneratoren mit einer Ausgangsleistung zwischen 0,5 und einigen KW, deren Ausgangsspannungen unter anderem eine der sogenannten ISM-Frequenzen (Industrial, Scientific, Medical Frequencies, 13,56 MHz, 27,12 MHz und 40,68 MHz) aufweisen. Um eine optimale Leistungsübertragung vom Hochfrequenz-Generator zum Verbraucher zu erzielen, muß die Impedanz des Verbrauchers konjugiert komplex zum Innenwiderstand des Generators sein. Typischerweise beträgt der Innenwiderstand eines Hochfrequenz-Generators 50 Ω. Die von 50 Ω abweichende Lastimpedanz des Verbrauchers wird über ein Anpassungsnetzwerk (sogenannte Matchbox) transformiert (Leistungsanpassung). Das Anpassungsnetzwerk besteht aus passiven reaktiven Bauelementen, erzeugt also keine Verlustleistung (im Idealfall). Mit diesen Anpassungsnetzwerken ist jedoch eine Leistungsanpassung stets nur für eine einzige Frequenz möglich; ändert sich also die Frequenz, muß die Matchbox neu eingestellt werden. Ferner ist die Impedanz-Transformation mit den Anpassungsnetzwerken nicht linear. Da der Verbraucher (das Plasma) bezüglich seiner Impedanz nicht konstant ist, ist optimale Leistungsübertragung nicht möglich. Die Nachstellung der Matchbox an die jeweilige Lastimpedanz ist schaltungstechnisch kompliziert und aufwendig. Hierzu ist nämlich ein Sensor bzw. Richtkoppler erforderlich, der die vom Verbraucher reflektierte Welle erfaßt und über ein dieser Welle entsprechendes Signal die passiven Bauelemente der Matchbox nachstellt.

Aus DE 33 37 811 A1 ist ein Hochfrequenz-Generator bekannt, der eine Gleichspannungs-Energiequelle aufweist, deren Ausgang mit einem steuerbaren elektronischen Schalter verbunden ist. Die durch den Schalter ein- und ausgeschaltete Gleichspannung wird einer Energiezwischenspeicher- und Übertragungsvorrichtung zugeführt, deren Ausgang mit einem Plasma erzeugenden Verbraucher verbunden ist. Der elektronische Schalter wird impulsartig von einer Steuerschaltung angesteuert, um die Ausgangsspannung der Energiequelle für kurze Zeit der Energiezwischenspeicher- und Übertragungsvorrichtung (also dem Transformator) zuzuführen. An dem Ausgang des Transformators entsteht infolge des Eingangsspannungsimpulses ein Hochspannungsausgangsimpuls zum Betreiben des Plasma erzeugenden Verbrauchers. Mit dem bekannten Generator lassen sich hochfrequente Hochspannungsimpulse, d. h. Impulse im MHz-Bereich nicht erzeugen, da der Transformator bei derartigen Eingangsfrequenzen an seinem Ausgang infolge seines ohmschen und seines induktiven sowie kapazitiven Widerstandes Hochspannungsimpulse mit derartigen Frequenzen nicht mehr übertragen bzw. erzeugen kann. Darüber hinaus ist der bekannte Hochspannungsimpulsgenerator nicht leistungsangepaßt, weshalb nur ein Bruchteil der von der Energiequelle zur Verfügung gestellten elektrischen Leistung

zum Plasma erzeugenden Verbraucher gelangt.

Aus R. Paul: "Elektronische Halbleiterbauelemente", Verlag B.C. Teubner Stuttgart (1986), S. 338 bis 347, ist es grundsätzlich bekannt, mit Leistungs-(POWER-) 5 MOSFET-Transistoren Schaltfrequenzen von einigen 100 KHz erzielen zu können.

In dem Artikel "HF-Generator mit Leistungs-MOSFETs", Dipl.-Ing. (FH) Ottmar Failing, Elektronik 15, S. 61 bis 65, 26.07.1985, ist ein HF-Generator mit einer 10 Ausgangsleistung von mehreren hundert Watt im Frequenzbereich 500 KHz bis 2 MHz beschrieben. Mittels eines Serienschwingkreises wird bei diesem bekannten HF-Generator die HF-Energie zur Ionisierung eines Plasmas eingekoppelt. Der HF-Generator verfügt also 15 über ein Anpassungsnetzwerk (in Form des Schwingkreises), das zwischen die POWER-MOSFET-Endstufe und die Last (Plasma) geschaltet ist.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Hochfrequenz-Generator für einen Plasma erzeugenden Verbraucher zu schaffen, bei dem ohne Zwischen- 20 schaltung eines Anpassungsnetzwerkes nahezu die volle elektrische Leistung ohne das Erfordernis einer Leistungsanpassung zum Verbraucher übertragen wird.

Zur Lösung dieser Aufgabe wird mit der Erfindung 25 ein Hochfrequenz-Generator mit den Merkmalen des Anspruchs 1 vorgeschlagen; vorteilhafte Weiterbildungen davon sind jeweils in den Unteransprüchen angegeben.

Nach der Erfindung ist sinngemäß vorgesehen, daß 30 der Plasma erzeugende Verbraucher ohne Zwischen- schalten eines Leistungsanpassungsnetzwerks direkt mit der die Leistung zur Verfügung stellenden Gleichspannungs-Energiequelle und einem durch ein hochfrequentes Rechteck-Steuersignal einer Steuerschaltung 35 gesteuerten elektronischen Schalter mit dualem Schaltverhalten verbindbar ist und daß die Energiequelle selbst die zum Betreiben des Plasma erzeugenden Verbrauchers benötigte Betriebsspannung liefert, ohne daß eine Transformation der durch den Schalter abwechselnd ein- und ausgeschalteten Ausgangsspannung der Energiequelle vor oder hinter dem Schalter erforderlich 40 ist.

Die der Erfindung zugrundeliegende Idee besteht also darin, den Plasma erzeugenden Verbraucher mit einer (idealen) Rechteck-Spannung mit gegebenenfalls einstellbarem Ein/Aus-Verhältnis zu betreiben. Diese Rechteck-Hochspannung weist eine extrem hohe Frequenz von beispielsweise 1 MHz bis 100 MHz auf. Der Vorteil des Betriebs eines Plasma erzeugenden Verbrauchers mit einer hochfrequenten Rechteck-Spannung besteht darin, daß nunmehr eine Leistungsanpassung zwischen der ein- und ausgeschalteten Ausgangsspannung und dem Verbraucher nicht erforderlich ist. Der Grund dafür ist wiederum in dem Umstand zu sehen, daß der Innenwiderstand des Hochfrequenz-Rechteckgenerators äußerst gering ist, da er ausschließlich durch den elektrischen Widerstand der Gleichspannungs-Energiequelle und des Schalters im eingeschalteten Zustand bestimmt ist. Bei einem Hochfrequenz- 55 Spannungsgenerator mit (im Idealfall) dem Innenwiderstand von 0 Ω ist jedoch eine Leistungsanpassung zu einem angeschlossenen Verbraucher nicht mehr erforderlich. Daher kann bei dem erfundungsgemäßen Generator, dessen Innenwiderstand deutlich, d. h. um eine 60 Größenordnung unter den typischen 50 Ω liegt, praktisch auf ein Leistungsanpassungsnetzwerk verzichtet werden, wobei trotzdem nahezu die volle Leistung zum Verbraucher übertragen wird.

muß die Gate-Spannung wesentlich niedriger sein, als in dem Fall, in dem der Verbraucher 16 zwischen Masse und MOSFET-Transistor 18 geschaltet ist.

Der Hochfrequenz-Generator 10 liefert eine Ausgangsleistung, die zwischen 0,5 und einigen kW liegt. Die Versorgungsspannung  $+U_B$  beträgt einige 100 Volt, so daß der MOSFET-Transistor 18 Ströme in der Größenordnung von 10 Ampere und mehr ein- und ausschalten muß. Zu diesem Zweck muß der MOSFET-Transistor 18 als Leistungstransistor ausgebildet sein. Die für diese Zwecke erforderlichen Transistoren sind am Markt erhältlich. Diese Leistungstransistoren weisen eine extrem geringe Eigeninduktivität auf, die jedoch noch zu groß ist, um Ströme von etlichen Ampere im ns-Bereich zu schalten. Um die Eigeninduktivität weiter herabzusetzen, sind die Drain-, Source- und Gate-Elektroden des MOSFET-Transistors 18 über jeweils mehrere Bonddrähte mit den entsprechenden Transistorgehäuse-Anschlüssen verbunden. Ferner sind an der Source-Elektrode 24 der Steuer- und Laststromkreis aufgeteilt, d. h. der MOSFET-Transistor 18 weist eine dem Steuerstromkreis zugeordnete Source-Elektrode und eine dem Verbraucherstromkreis zugeordnete Source-Elektrode auf. Ferner weist der MOSFET-Transistor 18 eine sogenannte Stripline-Low-Impedanz-Struktur und eine induktionsverhindernde interne Leitungsführung auf.

Als elektrische Verbindung zwischen dem MOSFET-Transistor 18 und der Last 16 dient der elektrische Leiter 20, der, da ein Anpassungsnetzwerk nicht erforderlich ist, weder eine ein- noch eine beidseitige Anpassung aufweist. Vorteilhafterweise ist der Schalter integraler Bestandteil des Verbrauchers.

Die Verbindung des in Stripline-Low-Impedanz-Struktur ausgebildeten MOSFET-Transistors 18 mit dem Verbraucher 16 einerseits und der Steuerschaltung 28 andererseits ist in Fig. 2 dargestellt. Das Gehäuse 17 des MOSFET-Transistors 18 weist einen Gate-Anschluß 26' mit Stripline geringer Impedanz auf, der elektrisch mit der das Hochfrequenz-Ansteuersignal für den MOSFET-Transistor 18 liefernden Steuerschaltung 28 verbunden ist. Ferner ist am Gehäuse 17 ein Drain-Anschluß 22' mit Stripline geringer Impedanz vorgesehen, an dem über den elektrischen Leiter 20 der Verbraucher 16 angeschlossen ist. Der andere Anschluß des Verbrauchers 16 ist, wie auch in Fig. 1 gezeigt, mit dem positiven Spannungspotential  $+U_B$  verbunden, das über den Kondensator 30 gegen Masse abgeblockt ist. Die Source-Elektrode 24 des MOSFET-Transistors 18 ist in eine Steuerstromkreis- und eine Verbraucherstromkreis-Elektrode aufgeteilt. Am Gehäuse 17 sind zwei "gateseitige" Source-Anschlüsse 25, 25' vorgesehen, die beide mit dem Steuerstromkreis zugeordneten gateseitigen Source-Elektrode verbunden sind, und zwei "drainseitige" Source-Anschlüsse 23, 23' vorgesehen, die mit dem Verbraucherstromkreis zugeordneten Source-Elektrode verbunden sind. Sämtliche Source-Anschlüsse 23, 23', 25, 25' sind an Masse gelegt, wobei die gateseitigen Source-Anschlüsse 25, 25' zusätzlich mit der Steuerschaltung 28 (genauer gesagt mit deren Massepotential) verbunden sind. Auf der den Drain-Anschluß 22' mit dem Verbraucher 16 verbindenden Leitung 20 liegt die Hochleistungs- und Hochfrequenz-Rechteckversorgungsspannung an, was in Fig. 2 entsprechend angedeutet ist.

Infolge der extrem geringen Anstiegs- und Abfallzeiten des Rechteck-Steuersignals der Steuerschaltung 28 befindet sich der MOSFET-Transistor 18 entweder im

(leitenden) EIN-Zustand oder im (sperrenden) AUS-Zustand. Die Zeiträume, in denen sich der MOSFET-Transistor 18 in seinen Übergangs- oder Teilleitzuständen befindet, sind derart gering, daß die in diesen Zuständen auftretenden Verlustleistungen vernachlässigt werden können. Ebenso vernachlässigbar sind die durch die internen MOSFET-Kapazitäten bedingten Verlustleistungen beim Schaltprozeß selbst. Im EIN-Zustand erzeugt der MOSFET-Transistor 18 also die Verlustleistung  $I^2R_{DSON}$ , wobei  $I$  den Strom und  $R_{DSON}$  den Widerstand des MOSFET-Transistors 18 zwischen dessen Drain- und Source-Elektroden bezeichnet. Durch Verwendung eines genügend großflächigen Power-MOSFET-Transistors kann der Widerstand  $R_{DSON}$  bis auf Werte im Bereich von 0,2 bis 1  $\Omega$  reduziert werden. Damit ist der Innenwiderstand des MOSFET-Transistors 18 deutlich geringer als der Innenwiderstand herkömmlicher Hochfrequenz-Generatoren, aber auch deutlich geringer als der Widerstand industrieller Plasma- und Laserverbraucher. Der Innenwiderstand des Hochfrequenz-Generators 10 gemäß Fig. 1 setzt sich zusammen aus dem Innenwiderstand 14 der Gleichspannungsquelle 12 und dem Widerstand  $R_{DSON}$ . Der Innenwiderstand 14 einer Gleichspannungsquelle ist aber relativ gering, so daß der Hochfrequenz-Generator 10 insgesamt einen nur geringen Innenwiderstand aufweist. Aufgrund des geringen Innenwiderstandes, insbesondere in Bezug auf den Widerstand bzw. die Impedanz der mit dem Hochfrequenz-Generator 10 betriebenen Verbraucher ist eine Leistungsanpassung nicht erforderlich. Denn auch ohne diese Leistungsanpassung ergibt sich bei dem Hochfrequenz-Generator 10 eine sehr gute Leistungsübertragung zum Verbraucher 16, da praktisch keine Verlustleistung an dem MOSFET-Transistor 18 entsteht.

Ein zweites Ausführungsbeispiel eines Hochfrequenz-Generators 31 ist in Fig. 3 dargestellt. Dieser Hochfrequenz-Generator 31 weist eine Gleichspannungsquelle 32 mit einem Innenwiderstand 34 auf. Die Gleichspannungsquelle liefert an ihren beiden Klemmen gegenüber Masse die positive und die negative Versorgungsspannung  $+U_B$  bzw.  $-U_B$ . Beide Versorgungsspannungspotentiale sind über jeweils einen Kondensator 35 gegen Masse abgeblockt. Zwischen den beiden Gleichspannungspotentialen der Gleichstromquelle 32 sind zwei elektronische Schalter in Form der MOSFET-Transistoren 36 und 38 geschaltet. Die Verbindungsleitung 40 für die beiden MOSFET-Transistoren 36, 38 ist über den Verbraucher 42 mit Masse verbunden. Die positive Versorgungsspannung  $+U_B$  liegt an der Drain-Elektrode 44 des MOSFET-Transistors 36 an, dessen Source-Elektrode 46 über die Leitung 40 mit der Drain-Elektrode 48 des MOSFET-Transistors 38 verbunden ist. An der Source-Elektrode 50 des MOSFET-Transistors 38 liegt die negative Versorgungsspannung  $-U_B$ .

Die Gate-Elektroden 52, 54 der MOSFET-Transistoren 36, 38 sind mit einer Steuerschaltung 56 elektrisch verbunden, die zwei um  $180^\circ$  phasenverschobene Rechteck-Ausgangssignale zum Ansteuern der beiden MOSFET-Transistoren 36, 38 im Gegentaktbetrieb erzeugt. Über die beiden MOSFET-Transistoren 36, 38, die beide als EIN-/AUS-Schalter betrieben werden, wird die Last 42 abwechselnd mit der positiven und der negativen Versorgungsspannung  $+U_B$  bzw.  $-U_B$  beliefert. Die Eigenschaften der MOSFET-Transistoren 36, 38 und der Steuerschaltung 56 entsprechen dem MOSFET-Transistor 18 und der Steuerschaltung 28 des

im Zusammenhang mit Fig. 1 beschriebenen Hochfrequenz-Generators 10.

## Patentansprüche

1. Hochfrequenz-Generator für einen im MHz-Bereich zu betreibenden plasmaerzeugenden Verbraucher (16; 42), mit einer Gleichspannungs-Energiequelle (12; 32) für den Verbraucher (16; 42) und mindestens einem durch ein hochfrequentes Rechteck-Steuersignal einer Steuerschaltung (28) gesteuerten elektronischen Schalter, wobei

- die Schaltung mindestens einen POWER-MOSFET-Transistor (18) aufweist, der interne Drain-, Source- und Gate-Elektroden aufweist, welche über jeweils mehrere Bonddrähte mit externen Drain-, Source- und Gate-Anschlüssen (22', 23, 23', 25, 25', 26') eines Gehäuses (17) des MOSFET-Transistors (18) eigeninduktivitätsmindernd verbunden sind,
- das Gehäuse (17) des MOSFET-Transistors (18) zwei mit dem Verbraucher (16; 42) verbindbare gateseitige Source-Anschlüsse (25, 25') und zwei mit der Steuerschaltung (28) verbundene drainseitige Source-Anschlüsse (23, 23') aufweist, wobei die gateseitigen und die drainseitigen Source-Anschlüsse (25, 25', 23, 23') über getrennte Bonddrähte mit den Source-Elektroden des MOSFET-Transistors (18) verbunden sind,
- die Anschlüsse (22', 23, 23', 25, 25', 26') des Gehäuses (17) des MOSFET-Transistors (18) jeweils Stripline-Struktur aufweisen,
- der plasmaerzeugende Verbraucher (16; 42) direkt ohne Zwischenschaltung eines Leistungsanpassungsnetzwerkes mit der Energiequelle (12; 32) und den Source- und Drain-Anschlüssen (23, 23', 22) verbindbar ist und
- die Energiequelle (12; 32) selbst die zum Betreiben des plasmaerzeugenden Verbrauchers (16; 42) benötigte Betriebsspannung liefert, ohne daß eine Transformation der durch den MOSFET-Transistor (18) abwechselnd ein- und ausgeschalteten Ausgangsspannung der Energiequelle (12; 32) erforderlich ist.

2. Generator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Rechteck-Steuersignal eine Frequenz zwischen 1 und 100 MHz aufweist.

3. Generator nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz zwischen 1 MHz und 50 MHz bei Anstiegs- sowie Abfallzeiten zwischen 2 ns und 5 ns beträgt.

4. Generator nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Energiequelle (12; 32) und der Schalter (18) jeweils zwischen einem gemeinsamen Potential und einer Anschlußklemme des plasmaerzeugenden Verbrauchers (16; 42) geschaltet sind.

5. Generator nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen Energiequelle (32) und Verbraucher (42) zwei in einer Halbbrücken-Schaltung angeordnete im Gegenaktbetrieb ansteuerbare POWER-MOSFET-Transistoren (36, 38) geschaltet sind.

6. Generator nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen Energiequelle und Verbraucher vier in Vollbrücken-Schaltung angeordnete, paarweise im Gegenaktbetrieb

ansteuerbare POWER-MOSFET-Transistoren geschaltet sind.

7. Verfahren zum Betreiben eines plasmaerzeugenden Verbrauchers, bei dem an den Verbraucher (16; 42) mittels eines Hochfrequenz-Generators nach einem der vorhergehenden Ansprüche eine Rechteck-Betriebsspannung im kV-Bereich mit einer Frequenz von 1 MHz bis 100 MHz angelegt wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

**- Leerseite -**

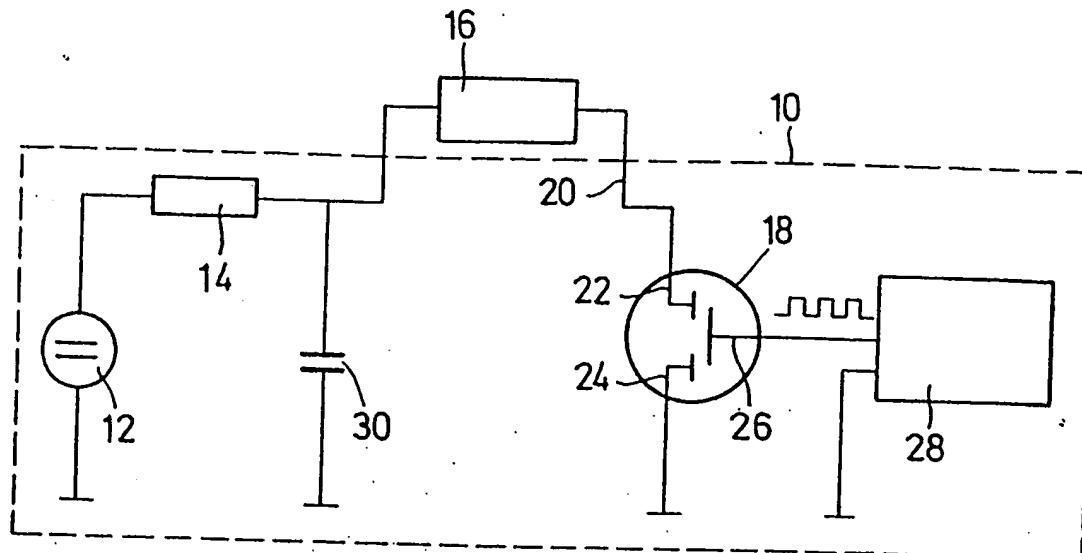


FIG. 1

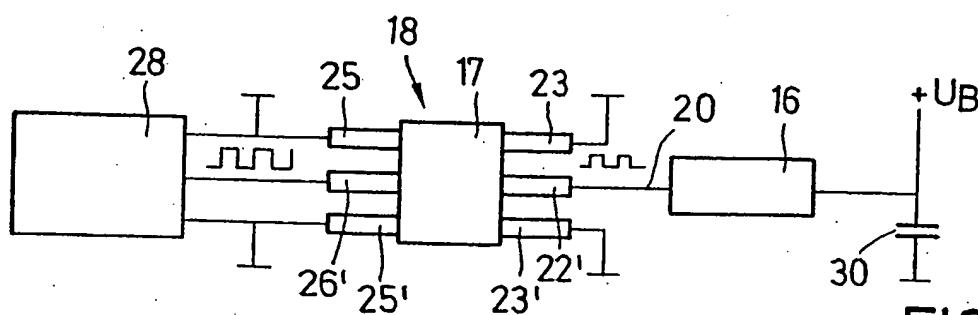


FIG. 2

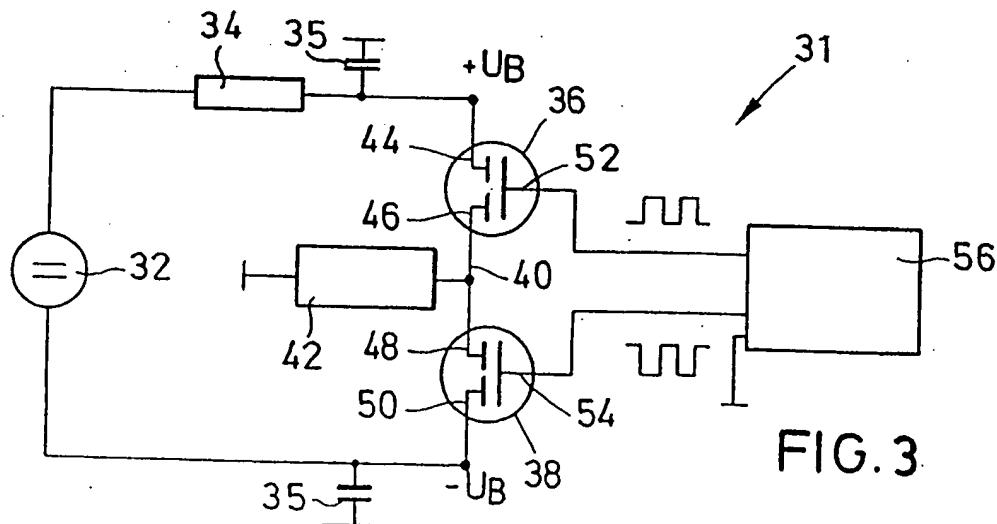


FIG. 3

dressler  
hochfrequenztechnik gmbh  
Werther Strasse 14-16  
5190 Stolberg

[stamp]  
RECEIVED  
[date illegible]

Patent Attorneys  
von Kreisler, Dr.-Ing † 1973  
Alek von Kreisler, Dipl.-Chem.  
G. Seling, Dipl.-Ing.  
H.-K. Werner, Dr.  
K. Schönwald, Dr.-Ing.  
J. F. Fues, Dr.  
Carola Keller, Dipl.-Chem.  
G. Dallmeyer, Dipl.-Ing.

Sg-Hi/bu

High Frequency Generator for a Plasma Generating Consumer

The invention relates to a high-frequency generator for a plasma generating consumer comprising a power source for the consumer.

For the power supply of plasma generating consumers, e.g., plasma chambers for etching, sputtering or the like, or high-power CO<sub>2</sub> lasers, as well as for the power supply of coils of industrial heating systems, high frequency generators supplying an output voltage with a frequency of between 50 kHz and 50 MHz are used. These power sources are high-capacity generators with an output of between 0.5 and several kW, whose output voltages have one of the ISM frequencies (industrial, scientific, medical frequencies, 13.56 MHz, 27.12 MHz, and 40.68 MHz). To optimize the power transfer from the high frequency

generator to the consumer, the impedance of the consumer must be a complex conjugate of the internal resistance of the generator. Typically, the internal resistance of a high frequency generator is  $50 \Omega$ . The load impedance of the consumer, which is different from  $50 \Omega$ , is transformed via a matching network, also referred to as a matchbox (power matching). The matching network comprises passive reactive components, i.e., it does not dissipate power (in the ideal case). With these matching networks, however, power matching is possible only for a single frequency. If the frequency changes, the matchbox must be reset. Furthermore, impedance transformation with matching networks is not linear. Since the consumer (the plasma) is not constant regarding its impedance, optimal power transfer is not possible. Adjusting the matchbox to the corresponding load impedance is complex in terms of circuitry as well as costly. For this requires a sensor or directional coupler, which detects the wave reflected by the consumer and adjusts the passive components of the matchbox by means of a signal corresponding to this wave.

The object of the invention is to provide a high frequency generator for a plasma generating consumer, in which almost the full electrical power is transferred to the consumer without interposition of a matching network.

To attain this object, the invention proposes to connect between the power source and the consumer at least one electronic switch with dual

switching characteristics controlled by a high frequency control signal, to which the consumer is connected line-free.

The output stage of the inventive high-frequency generator is provided with an electronic switch with dual switching characteristics, which is clocked by a high-frequency control signal, i.e., is switched on and off at high frequency. The control signal is designed such that the electronic switch is either in its ON or in its OFF state. This electronic switch is connected to the consumer line-free. Line-free in terms of the invention means that the high-frequency line between the switch and the consumer does not have matching at one or both ends. The connection between the switch and the consumer can thus be a simple electric conductor. The consumer is therefore connected with the switch directly, i.e., without interposition of a matching network. Advantageously, the switch is integrated in the consumer.

Because the electronic switch is switched on and off at high frequency, a high frequency alternating voltage is produced at the terminals of the high frequency generator. At the low-resistance electronic switch, there is almost no power loss when the switch is in its ON state. The power loss level of the generator is determined by the internal resistance of the power source, which is also very low (clearly below  $50 \Omega$ ). The high-frequency generator according to the invention thus has an extremely low internal resistance and therefore causes practically no power loss, so that very good power transfer is achieved even without a matching network. This good power transfer is ensured at all frequencies.

According to an advantageous further development of the invention, the electronic switch used is a MOSFET, which is controlled by a square wave control signal that is produced by a control circuit. The MOSFET, if dimensioned accordingly, is distinguished by an extremely low ON resistance on the order of magnitude of 0.2 to 1  $\Omega$ , i.e., the internal resistance of the electronic switch of the high frequency generator is clearly lower than 50  $\Omega$  and also lower than that of industrial plasma and laser loads, whose impedances range from 5 to 100  $\Omega$ .

Advantageously, the frequency of the square wave output signal ranges between 1 MHz and several 100 MHz, with rise and decay times of between 1 and 10 ns. Due to the extremely short rise and decay times of the square wave output signal, the MOSFET is in its (transient transitional) partially conducting states only for a practically negligible time span, i.e., it is operated almost like an ideal switch. If a square wave control signal is used whose frequency is between 1 and 50 MHz and whose rise and decay times are between 2 and 5 ns, the power losses of the MOSFET caused by the internal MOSFET capacitances and the partially conducting states during the switching process is practically negligible.

Advantageously, the power source used is a DC voltage source. The DC voltage source has the advantage of relatively low internal resistance.

Preferably, two or four MOSFETs are provided, which are arranged as a half bridge or full bridge circuit and can be controlled in push-pull operation or by pairs in push-pull operation.

The invention will now be described in greater detail with reference to the embodiments depicted by way of example in the drawings, in which:

Figure 1 shows a first exemplary embodiment of a high-frequency generator with a single electronic switch that applies a supply voltage in time with the high frequency to a consumer.

Figure 2 schematically illustrates the direct connection of the MOSFET with the consumer, and

Figure 3 shows a second exemplary embodiment of a high frequency generator with two electronic switches arranged as a half bridge circuit and controlled in push-pull operation, which apply a positive or negative supply voltage in time with the high frequency to the consumer.

Figure 1 shows a first exemplary embodiment of a high frequency generator 10. Said high frequency generator has a DC voltage source 12 with an internal resistance 14. DC voltage source 12 whose one terminal is connected to ground, supplies the positive supply voltage  $+U_B$  behind internal resistance 14. A so-called power MOSFET

16 and the plasma generating consumer 18, e.g., a CO<sub>2</sub> laser or a sputter system, are connected between internal resistance 14 and ground. Drain electrode 20 of MOSFET 16 is connected with internal resistance 14, while the source electrode 22 is connected via an electric conductor 24 with a terminal of consumer 18 whose other terminal is connected to ground. Electric conductor 24 is an ordinary line that is matched neither on one nor on both sides. Gate electrode 26 of MOSFET 16 is electrically connected with the output of a control circuit 28 (schematically shown in Figure 1 as a block). At its output, control circuit 28 supplies a high frequency square wave control signal for controlling MOSFET 16. The frequency of the square wave signal is 13.56, 27.12 or 40.68 MHz (ISM frequency). The rise and decay times of the square wave signal are approximately 2 to 5 ns.

The output of high frequency generator 10 ranges from 0.5 kW to several kW. The supply voltage +U<sub>S</sub> is several 100 volts, such that MOSFET 16 must switch on and off currents on the order of magnitude of 10 amperes and more. To this end, MOSFET 16 must be configured as a power transistor. The transistors required for these purposes are commercially available. These power transistors have extremely low self-inductance, which is still too high, however, to switch currents of several amperes in the ns range. To reduce the self-inductance further, the drain, source, and gate electrodes of MOSFET 16 are each connected via several bond wires with the corresponding transistor housing terminals. Furthermore, the control and load circuits are divided at source electrode 22, i.e., MOSFET 16 has a source electrode

assigned to the control circuit and a source electrode assigned to the consumer circuit. MOSFET 16 further has a stripline low-impedance structure and an induction-preventing internal wiring arrangement. Control circuit 28 has extremely low internal resistance (0.2 to  $1\Omega$ ) to enable it to transfer the high gate capacitance of MOSFET 16 in a few ns.

The electric connection between the MOSFET and load 18 is formed by electric conductor 24, which has neither one-sided nor two-sided matching since a matching network is not required. Advantageously, the switch is an integral component of the consumer. This case is schematically illustrated in Figure 2. Housing 17 of MOSFET 16 has a gate terminal lug 27, which is electrically connected with control circuit 28. Further provided on housing 17 is a drain terminal lug 21, to which a conductor 19 is connected, to which the positive voltage potential  $+U_B$  is applied. The source electrode of MOSFET 16 is divided into a control circuit electrode and a consumer circuit electrode. Accordingly, a terminal lug 23 that is connected with the source electrode for the consumer circuit and a terminal lug 23' that is connected with the source electrode for the control circuit are provided on housing 17. The one electrode 25 of plasma chamber 18' of consumer 18 is directly connected with terminal lug 23. The other electrode 25' of consumer 18 is connected with terminal lug 23' of the source electrode for the control circuit via a conductor 29 which is connected to ground. All of these consumer circuit lines are relatively

wide and thick strip-type lines, i.e., lines with relatively large cross sections and therefore correspondingly low ohmic resistance.

Due to the extremely short rise and decay times of the square wave control signal of control circuit 28, MOSFET 16 is either in a (conductive) ON state or in a (blocking) OFF state. The time periods during which MOSFET 16 is in its transitional or partially conducting states are so short that the power losses occurring in these states are negligible. Likewise negligible are the power losses caused by the internal MOSFET capacitances during the switching process itself. In the ON state, MOSFET 16 thus causes a power loss of  $I^2R_{DSON}$ , where  $I$  is the current and  $R_{DSON}$  is the resistance of MOSFET 16 between the drain and source electrodes thereof. By using a power MOSFET with a sufficiently large surface, resistance  $R_{DSON}$  can be reduced to values in the range of 0.2 to 1  $\Omega$ . Thus the internal resistance of MOSFET 16 is clearly lower than the internal resistance of conventional high frequency generators, but it is also clearly lower than the resistance of industrial plasma and laser consumers. The internal resistance of high frequency generator 10 according to Figure 1 is composed of internal resistance 14 of DC voltage source 12 and internal resistance  $R_{DSON}$ . However, internal resistance 14 of a DC voltage source is relatively low, such that the total resistance of high frequency generator 10 is low. Due to the low internal resistance, particularly in relation to the resistance or impedance of the consumers operated by high frequency generator 10, no power matching is required. Even without such power matching, very good power transfer to consumer 18 is achieved with

high frequency generator 10, since practically no power loss occurs at MOSFET 16.

A second exemplary embodiment of a high-frequency generator 30 is depicted in Figure 3. This high frequency generator 30 has a DC voltage source 32 with an internal resistance 34. At its two terminals to ground, the DC voltage source supplies the positive and negative supply voltage  $+U_B$  and  $-U_B$ , respectively. Two electronic switches in the form of MOSFETs 36 and 38 are connected between the two DC voltage potentials of DC power source 32. The connecting lead 40 for the two MOSFETs 36, 38 is connected to ground via consumer 42. The positive supply voltage  $+U_B$  is applied to drain electrode 44 of the MOSFET 36 whose source electrode 46 is connected with the drain electrode 48 of MOSFET 38 via lead 40. The negative supply voltage  $-U_B$  is applied to source electrode 50 of MOSFET 38.

Gate electrodes 52, 54 of MOSFETs 36, 38 are electrically connected with a control circuit 56, which generates two square wave output signals out of phase by  $180^\circ$  to control the two MOSFETs 36, 38 in push-pull operation. The positive and negative supply voltage  $+U_B$  and  $-U_B$  is alternately applied to load 42 via the two MOSFETs 36, 38, which are both operated as ON/OFF switches. The properties of MOSFETs 36, 38 and control circuit 56 correspond to those of MOSFET 16 and control circuit 28 of high frequency generator 10, which was described with reference to Figure 1.

CLAIMS

1. High frequency generator for a plasma generating consumer (18; 42), with a power source for the consumer (18; 42), characterized in that at least one electronic switch (16; 36, 38) with dual switching characteristics, controlled by a high frequency control signal, is connected with the power source (12; 32) and the consumer (18; 42) can be connected to the switch (16; 36, 38) line-free.
2. Generator as claimed in Claim 1, characterized in that the electronic switch is a MOSFET (16; 36, 38), which is controlled by a square wave control signal generated by a control circuit (28; 56).
3. Generator as claimed in Claim 2, characterized in that the square wave control signal has a frequency of between 1 MHz and several 100 MHz, and has rise and decay times of between 1 ns and 10 ns.
4. Generator as claimed in Claim 3, characterized in that the frequency is between 1 MHz and 50 MHz and the rise and decay times are between 2 ns and 5 ns.
5. Generator as claimed in any one of Claims 1 to 4, characterized in that the power source is a DC voltage source (12; 32).

6. Generator as claimed in any one of Claims 1 to 5, characterized in that two MOSFETs (36, 38) arranged in a half-bridge circuit and controllable in pull-push operation are connected between the power source (32) and the consumer (42).
7. Generator as claimed in any one of Claims 1 to 5, characterized in that four MOSFETs arranged in a full-bridge circuit and controllable in pairs in push-pull operation are connected between the power source and the consumer.

ABSTRACTHigh Frequency Generator for a Plasma Generating Consumer

The high frequency generator (10) for a plasma generating consumer (18) comprises a power source (12) with internal resistance (14), an electronic switch in the form of a MOSFET (16), and a control circuit (28), which generates a high frequency square wave control signal to control the MOSFET (16). The MOSFET (16), due to the high frequency control, with rise and decay times of approximately 2 to 5 ns, is practically only in the OFF or in the ON state. In the ON state, it dissipates relatively little power, which contributes to the fact that the total internal resistance of the high frequency generator (10) is relatively low. Power matching to the consumer (18), whose impedance is substantially greater compared to the internal resistance of the high frequency generator (10), is not required in this case. The need for a power matching network is thus eliminated in the inventive high frequency generator (10).

(Figure 1)

June 11, 2002

## CERTIFICATE OF ACCURACY

STATE OF PENNSYLVANIA )  
COUNTY OF ALLEGHENY )  
SS:

I, Gina Broderick, being duly sworn, declare:

That I am a professional translator accredited by the American Translators Association for German to English and English to German translation and have proficient knowledge of both the German and the English languages.

That I have made the attached English translation from the annexed German document entitled "High Frequency Generator for a Plasma Generating Consumer" and hereby certify that the same is a true and complete translation to the best of my knowledge, ability and belief.

Gene C. M. Brodeur, Jr.

Sworn to before me this  
11th day of June 2002

Harry M. Rubin  
Notary Public

